

基于探索性空间数据分析的海坛岛土地利用生态风险评价^{*}

吴 剑¹ 陈 鹏^{1*} 文超祥² 傅世锋¹ 陈庆辉¹

(¹国家海洋局第三海洋研究所, 福建厦门 361005; ²厦门大学建筑与土木工程学院, 福建厦门 361005)

摘 要 生态风险评价作为一种新型环境管理工具, 提供了量化评估土地利用变化生态效应的新视角. 本研究以福建海坛岛为案例区, 基于 1990 年 Landsat TM 与 2010 年 SPOT5 遥感影像、2030 年平潭综合试验区总体布局规划图和野外调查等数据, 构建度量生态终点的生态风险表征指数, 运用探索性空间数据分析中的空间自相关和半方差分析方法, 对海坛岛过去—现在—未来不同土地利用情景下生态风险进行评价, 分析其潜在的风险性及其变化趋势. 结果表明: 海坛岛生态风险指数存在明显的尺度效应, 在 3000 m 范围内表现出较强的正相关, 生态风险指数空间分布以高—高聚集和低—低聚集类型为主; 生态风险指数具有显著的各向同性特点, 且其空间分布与对应时期局部空间自相关指数分布模式一致; 各生态风险等级区年际变化较为剧烈, 波动态势与波动幅度均有所不同; 低生态风险区呈先增后降趋势, 中、高生态风险区呈先降后升趋势. 规划期的人为扰动强烈, 高生态风险区在整个区域扩展蔓延. 为减低土地利用生态风险、维护区域生态安全, 可采取的生态风险控制策略包括: 优化土地资源空间格局、保护关键生态区域、控制建设用地规模.

关键词 海坛岛 土地利用 生态风险 探索性空间数据分析(ESDA)

文章编号 1001–9332(2014)07–2056–07 中图分类号 Q149; X835 文献标识码 A

Ecological risk assessment of land use based on exploratory spatial data analysis (ESDA): A case study of Haitan Island, Fujian Province. WU Jian¹, CHEN Peng¹, WEN Chao-xiang², FU Shi-feng¹, CHEN Qing-hui¹ (¹Third Institute of Oceanography State Oceanic Administration, Xiamen 361005, Fujian, China; ²College of Architecture and Civil Engineering, Xiamen University, Xiamen 361005, Fujian, China). *Chin. J. Appl. Ecol.*, 2014, 25(7): 2056–2062.

Abstract: As a novel environment management tool, ecological risk assessment has provided a new perspective for the quantitative evaluation of ecological effects of land-use change. In this study, Haitan Island in Fujian Province was taken as a case. Based on the Landsat TM obtained in 1990, SPOT5 RS images obtained in 2010, general layout planning map of Pingtan Comprehensive Experimental Zone in 2030, as well as the field investigation data, we established an ecological risk index to measure ecological endpoints. By using spatial autocorrelation and semivariance analysis of Exploratory Spatial Data Analysis (ESDA), the ecological risk of Haitan Island under different land-use situations was assessed, including the past (1990), present (2010) and future (2030), and the potential risk and its changing trend were analyzed. The results revealed that the ecological risk index showed obvious scale effect, with strong positive correlation within 3000 meters. High-high (HH) and low-low (LL) aggregations were predominant types in spatial distribution of ecological risk index. The ecological risk index showed significant isotropic characteristics, and its spatial distribution was consistent with Anselin Local Moran *I* (LISA) distribution during the same period. Dramatic spatial distribution change of each ecological risk area was found among 1990, 2010 and 2030, and the fluctuation trend and amplitude of different ecological risk areas were diverse. The low ecological risk area showed a rise-to-fall trend while the medium and high ecological risk areas

* 国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项资金项目(海三科 2011029)和海洋公益性行业科研专项经费项目(201305009-2)资助.

** 通讯作者. E-mail: chenpeng@gmail.com

2013-11-25 收稿, 2014-04-22 接受.

showed a fall-to-rise trend. In the planning period, due to intensive anthropogenic disturbance, the high ecological risk area spread throughout the whole region. To reduce the ecological risk in land-use and maintain the regional ecological security, the following ecological risk control strategies could be adopted, *i. e.*, optimizing the spatial pattern of land resources, protecting the key ecoregions and controlling the scale of construction land use.

Key words: Haitan Island; land use; ecological risk; exploratory spatial data analysis (ESDA).

DOI:10.13287/j.1001-9332.20140425.004

由景观城市化导致的大规模土地系统变化引人注目,已经成为一种非常典型的人地相互作用过程^[1-2]. 全球土地计划(global land project, GLP)的研究核心领域之一是强调在土地系统变化后的综合分析和模拟^[3-4]. 认识和理解城市化进程中土地利用变化的资源、环境、生态和灾害效应,寻求其资源节约和环境友好的可持续发展途径,也已成为当代中国地理科学的核心问题之一^[5]. 生态风险评价作为一种新型环境管理工具,提供了定量化评估土地利用变化生态效应的新视角^[6-10]. 美国国家环保局(USEPA)^[11-12]将生态风险定义为一种或多种压力形成的不利生态效应的可能性过程,如何定量地表征生态风险成为现阶段研究焦点问题之一^[13-14]. 探索性空间数据分析(exploratory spatial data analysis, ESDA)以空间关联测度为核心,通过对事物或现象空间分布格局的描述与可视化,发现空间集聚和空间异常,揭示研究对象之间的空间相互作用机制^[15-17]. ESDA 具有强大的空间解析分析及表达能力,为土地利用生态风险定量化研究提供了新的技术手段. 本文以福建海坛岛为典型案例区,对海坛岛过去-现在-未来不同土地利用情景下的生态风险进行评价,分析其潜在的风险性及其变化趋势,以期在海岛开发与产业布局、生态规划与建设提供科学依据.

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

海坛岛又名平潭岛、海山,地处福建省沿海中部(25°23′—25°40′N, 119°45′—119°53′E). 该岛是福建省第一大岛、中国第五大岛,陆地面积 324 km²,距离大陆 3.25 km,为大陆岛,以海积平原为主,多花岗岩陵地,最高峰君山海拔 438.2 m,海岸蜿蜒曲折,岸线长度 217 km. 该区属亚热带海洋性季风气候,年均气温 19.5℃,年降水量 1196.2 mm,年 7 级以上大风日数为 125 d,7—9 月常受台风影响. 海坛岛是平潭县的主岛,县人民政府设在潭城镇,全岛有 7 镇 4 乡,2011 年人口约 40 万^[18]. 2009 年批准

设立海峡西岸经济区综合实验区,发展定位为两岸交流合作先行先试的示范区、海峡西岸经济社会协调发展的先行区、海峡西岸生态宜居的新兴海岛城市. 海坛岛作为平潭综合实验区的核心区域,其开发建设采取组团推进、分时序开发的空间发展模式,构建“四区、十一组团”的功能互补、协调发展的空间开发格局.

1.2 数据来源与预处理

研究采用的数据源为 1990 年 Landsat TM(分辨率 30 m)和 2010 年 ALOS(分辨率 2.5 m)遥感影像数据,以及平潭综合试验区总体布局规划图[平潭综合实验区总体规划(2010—2030)]. 参考文献[19-20]将 1990 和 2010 年研究区域内的土地利用类型分为 8 类:林地(L₁)、农用地(L₂)、居民地(L₃)、养殖区(L₄)、水体(L₅)、沙滩(L₆)、建设用地(L₇)、道路交通(L₈). 2030 年远期规划区内划分为 7 类土地利用类型:生态绿地、农用地、居住用地、建设用地、交通用地、水体和沙滩(沙滩采用 2010 年遥感解译数据). 将上述土地利用类别作为风险受体进行评价.

在遥感图像处理软件 Erdas 支持下,对 2 个时相的遥感影像和远景规划图进行几何校正、空间配准、假彩色合成与融合、影像图像增强与影像裁剪等预处理;野外调查建立遥感解译标志,采用监督分类法与人机交互结合方法解译,提取出 3 个时期的土地利用矢量数据. 数据转换到统一的坐标系(WGS_1984_UTM_Zone_50N)和投影系统(Transverse_Mercator),投影带中央经线 117°. 遥感影像采用 .img 格式,栅格数据采用 .grid 格式(30 m × 30 m),矢量数据采用 .shape 格式.

1.3 生态风险指数构建

参考 USEPA 生态风险评估框架与相关学者的研究成果^[21-24],基于土地利用的景观响应与生态服务价值,构建度量生态终点的生态风险表征指数(ecological risk index, ERI),以建立土地利用变化与区域生态风险之间的经验联系. 计算公式如下:

$$ERI = \frac{PD_j}{CONTAG_j} \times \sum_{i=1}^n \left[\frac{A_{ij}}{A_j} \times V_i \right]$$

式中: PD_j 和 $CONTAG_j$ 分别为第 j 个样方的斑块密度和蔓延度, 二者比值既可反映景观破碎化过程, 也反映了人类干扰活动的强弱程度^[22]; V_i 为第 i 类土地利用类型的生态服务价值系数; A_{ij} 为第 j 个区域 i 类土地利用类型面积; A_j 为第 j 个样方总面积。

在 Fragstats 4.0 中, 应用移动窗口法(边长 500 m) 计算景观水平的斑块密度和蔓延度指数并输出其空间分布栅格数据, 景观响应指数的计算公式见 Fragstats 4.0 的帮助文件。生态服务价值系数的确定参照谢高地等^[25] 提出的“中国陆地生态系统生态服务价值当量表”以及厦门滨海湿地生态服务价值核算成果^[26]。采用 500 m × 500 m 的单元网格对景观格局指数和生态风险指数进行空间化, 采样方式为等间距系统采样法。同时对各评价指标进行极差标准化转换到 [0, 1] 区间。其中, 转换后的林地、农用地、居民地、养殖区、水体、沙滩, 以及道路与建设用地的生态价值系数分别为 0.470、0.142、0.013、0.061、1.000、0.124、0。

1.4 空间数据探索

1.4.1 空间自相关 空间自相关是空间依赖性的重要形式, 指研究对象与其空间位置之间存在的相关性。全局空间自相关用于测度属性值在整个区域的空间分布特征和关联程度, 局部空间自相关主要分析局部乃至每个空间单元的属性值在异质性空间的分布格局。本研究选取全局空间自相关指数(global Moran I) 及局部空间自相关指数(Anselin local Moran I , LISA)^[27-29] 对海坛岛 3 个时期的生态风险指数的空间模式进行度量。采用 GS+ 9.0 (www.Gammadesign.com) 软件计算不同空间尺度下生态风险指数的 Moran I 值(图 1)。局部空间自相关利用 GeoDa 1.4.1 软件进行分析, 采用 Queen 的二阶邻接权重矩阵计算 LISA。

1.4.2 地统计学 生态风险指数本身是一种空间变量, 可以利用地统计学方法进行空间特征分析。以半方差函数作为工具, 进行生态风险指数的空间结构分析及其最优化模拟, 并通过半方差函数的主要参数(如块金值(nugget)、基台值(sill)、变程(range)与块金效应(nugget effect)等定量地描述空间变量的空间异质性程度、组成、尺度和格局的特征^[30-31]。应用 GS+ 9.0 软件完成生态风险指数半方差函数的计算。生态风险程度的空间可视化表达在 ArcGIS 9.3 中的地统计学模块支持下完成, 以半方差函数的理论模型参数为控制参数, 应用普通克里格法(ordina-

ry Kriging) 进行插值与模拟。

2 结果与分析

2.1 空间自相关分析

2.1.1 全局空间自相关分析 海坛岛生态风险指数的全局 Moran I 值存在明显的尺度效应(图 1)。随着尺度增大, 3 个时期的 Moran I 值均呈下降趋势且变化趋势相似, 说明随着空间距离的增大, 生态风险指数在空间分布上的差异性明显增加, 而相似性减少。从变异程度上看, 在 3000 m 范围内表现出较强的正相关, 且随着尺度增大而急剧减少; 在 3000 m 以上的相关性不明显, Moran I 值在 0 附近有小幅波动。

1990、2010 和 2030 年的全局 Moran I 值分别为 0.4672、0.4203 和 0.3923, 说明生态风险指数整体上呈正相关, 在空间上表现为聚集分布; 全局 Moran I 值随时间推移而下降, 说明空间自相关程度有所减弱, 空间趋同性逐渐降低。城市化过程影响着生态风险指数的空间格局, 并导致其空间分布由聚集向均匀过渡。

2.1.2 局部空间自相关分析 利用 GEODA 软件计算海坛岛 1990—2030 年生态风险指数的 LISA 系数值, 并进行 z 检验基础上($\alpha = 0.05$) 绘制 LISA 分布图(图 2)。结果表明, 3 个时期的生态风险指数空间分布均以高-高聚集(HH) 和低-低聚集(LL) 类型为主, 而高-低集聚(HL) 与低-高集聚(LH) 则呈零散分布。研究期间, 生态风险指数空间分布状态发生了明显变化, HH 区呈现出聚集→萎缩→分散趋势, 而 LL 区呈现分散→聚集→分散趋势。1990 年, HH 区明显聚集在海坛岛南部的北厝镇和岚城乡, 而 LL 区成片分布于海坛岛北部的芦洋乡和流水镇。2010 年, HH 区仍聚集在北厝镇和岚城乡, 但范围缩小,

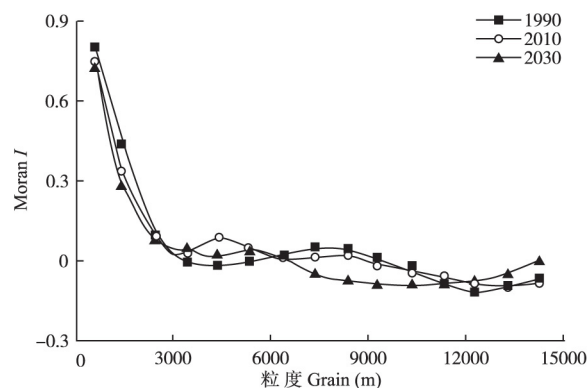


图 1 生态风险指数的 Moran I 值对尺度变化的响应

Fig. 1 Moran I of ecological risk index responds to grain change.

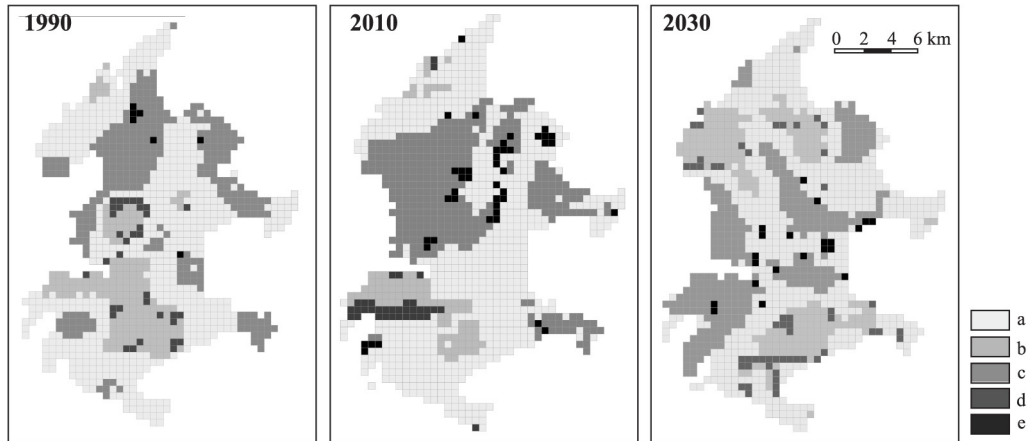


图2 海坛岛 1990、2010 和 2030 年生态风险指数局部空间自相关图

Fig.2 LISA cluster map of Haitan Island in 1990, 2010 and 2030.

a) 不显著 Not significant; b) 高高 High-high; c) 低低 Low-low; d) 低高 Low-high; e) 高低 High-low.

外围分布着 LH 区; LL 区范围以平原镇和芦洋乡为中心向周边扩展, 其与中楼乡、流水镇过渡地带分布着 HL 区。2030 年, HH 区东移聚集在澳前镇、潭城

镇, 向北则聚集在芦洋乡和苏澳镇; LL 区呈小片聚集在北厝镇、潭城镇、流水镇和中楼乡。

2.2 生态风险指数的空间结构分异

通过生态风险指数值的直方图可知, 数据符合正态分布。为探索生态风险指数的方向性结构, 在各向同性的基础上对 0° 、 45° 、 90° 和 135° 等 4 个方向进行各向异性搜索计算, 容限角为 22.5° , 结果表明 3 个时期的生态风险指数具有显著的各向同性特点。因此, 本文只讨论各向同性。利用 GS+ 软件计算得到 3 个时期生态风险指数的半方差函数散点图 (图 3) 根据其变化趋势, 用具有阈值 (基台值 sill) 的模型分别拟合, 并以决定系数最大、残差最小为选择标准, 选出最优的半方差拟合模型。根据拟合的球状模型、指数模型和高斯模型得到相关的模型参数值 (表 1), 进行空间结构分异分析。

基台值是衡量生态风险指数波动幅度的参数。研究区生态风险指数的基台值从 1990 年的 1.27×10^{-3} 增加至 2030 年的 4.49×10^{-3} (表 1), 表明生态风险的空间分布差异呈增大趋势。

变程反映了生态风险指数空间自相关的尺度状况。研究区生态风险指数的变程值从 1990 年的 2830 m 降至 2030 年的 1310 m, 表明生态风险指数的相关性范围在缩小。

块金与块金效应表示随机因素对生态风险指数变量引起的变异大小。3 个时期生态风险指数的半方差函数中都存在块金效应现象, 且呈现不断增强趋势, 从 1990 年的 0.01×10^{-4} 增加到 2030 年的 6.5×10^{-4} , 表明研究区非结构因素作用逐渐增强。此外, 块金效应也反映了随机因素对生态风险指数变

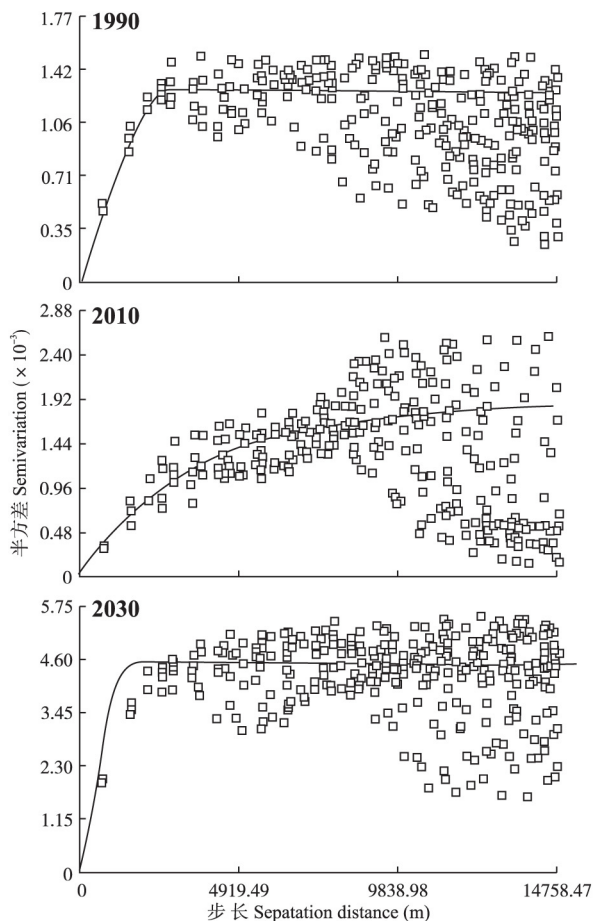


图3 海坛岛 1990、2010 和 2030 年生态风险指数的等方向变异函数曲线图

Fig.3 Isotropic semi-variogram curves of ecological risk index in Haitan Island of 1990, 2010 and 2030.

表 1 生态风险指数半方差函数的拟合模型及参数
Table 1 Semi-variogram fitting models and its parameters of ecological risk index

年份 Year	模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	变程 Range (m)	块金效应 Nugget effect (%)	决定系数 Decision coefficient	残差 Residual
1990	S	0.01×10^{-4}	1.27×10^{-3}	2830	0.1	0.88	1.28×10^{-7}
2010	E	0.14×10^{-4}	1.86×10^{-3}	2650	0.8	0.97	0.23×10^{-8}
2030	G	6.50×10^{-4}	4.49×10^{-3}	1310	14.5	0.98	2.18×10^{-7}

S: 球状模型 Spherical model; E: 指数模型 Exponential model; G: 高斯模型 Gaussian model.

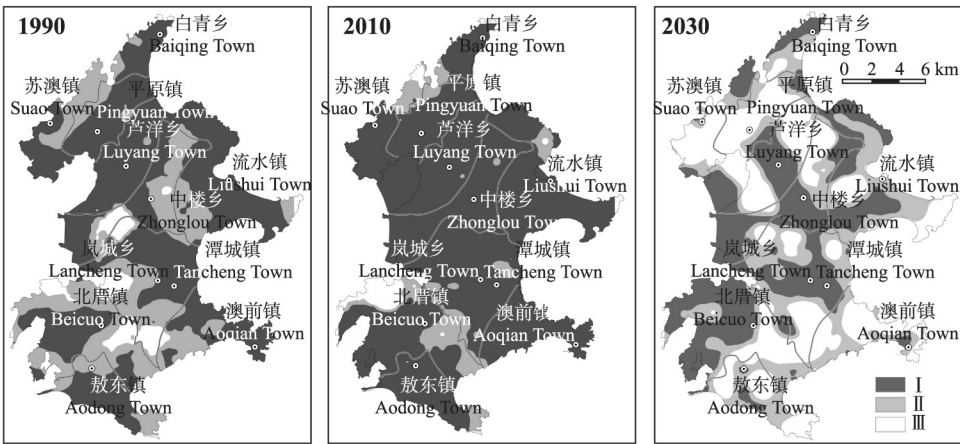


图 4 海坛岛 1990、2010 和 2030 年土地利用生态风险指数(ERI) 空间分布图

Fig.4 Spatial distribution map of ERI in Haitan Island for 1990 ,2010 and 2030.

I: $ERI \leq 0.05$; II: $0.05 < ERI \leq 0.1$; III: $ERI > 0.1$.

量空间分异的影响程度. 3 个时期块金效应均 <25% ,说明变量具有较强的空间自相关性,块金效应逐年增大也表明非结构因素对生态风险指数空间分异的影响效应在增强,尤其在 2030 年呈现跳跃式增长,这与规划期内由政策因素导致规模化土地利用改变的情况相关.

2.3 生态风险指数的时空分异

根据半方差函数模型参数,利用 ArcGIS 的地统计学模块,绘制出 3 个时段生态风险空间分布图(图 4),该图直观显示了生态风险指数在空间上的分布情况与变化趋势.3 个时期生态风险指数高、低值分布与其对应时期 LISA 分布相一致.1990 年,生态风险高值区呈斑块状分布于农用地与林地、水域的交错地带;此时段人为干扰活动以农牧业为主,生态风险强度较弱(最高值仅为 0.2723).2010 年,生态风险高值区呈点状分布于建设用地与林地、水域的交错地带;此时段农业和城镇发展达到相对稳定状态,两种用地类型连片导致生态风险低值区在研究区蔓延扩展;此时段人为干扰活动以局部城镇建设开发为主,生态风险强度较强(最高值为 0.4348).2030 年,生态风险高值区呈带状分布于城市用地与生态用地、农业用地、水域的交错地带,并

以交通干线为轴线导向;此时段土地利用格局经历着全方位开发与改造,但生态风险强度有所下降(最高值为 0.3586).

为了比较不同时期生态风险指数的大小,采用相对指标法对研究区不同时期的生态风险指数进行划分.利用 ArcGIS 中的 Natural Break 法将生态风险指数分成 3 个等级:低生态风险($ERI \leq 0.05$)、中生态风险($0.05 < ERI \leq 0.1$)、高生态风险($ERI > 0.1$),并统计各级别的面积百分比.1990 年,海坛岛生态风险类型以中低生态风险为主,低生态风险区占研究区总面积的 63.1%,中生态风险区占 31.0%,高风险区仅占 5.9%.2010 年,低生态风险区占绝对优势,其面积比例增加至 88.3%,而中、高生态风险区的占比分别降至 9.1%、2.6%.2030 年,3 类生态风险区面积比例接近,低生态风险区降至 36.2%,中生态风险区占 30.0%,高生态风险区增至 33.8%.

3 结 语

研究期间,海坛岛生态风险指数存在明显的尺度效应,在 3000 m 范围内表现出较强的正相关,生态风险指数空间分布以高-高聚集(HH)和低-低聚

集(LL)类型为主;生态风险指数具有显著的各向同性特点,且其空间分布与对应时期LISA分布模式相一致;各生态风险等级区之间转化较为剧烈,波动态势与波动幅度均有所不同;低生态风险区呈先增后降趋势,中、高生态风险区呈先降后升趋势。在规划期人为扰动强烈,高生态风险区更是在整个区域扩展蔓延。

为减低土地利用生态风险、维护区域生态安全,可采取的生态风险控制策略包括:优化土地资源空间格局、保护关键生态区域、控制建设用地规模以缓冲其扩张带来的生态风险。生态风险高值区分布在生态价值系数大、景观破碎化程度高的交错地带,这是控制海坛岛生态安全格局的关键区域;应加强此地带景观斑块的生态保育和生态修复,形成高效的自然保护系统。生态风险低值区分布于城市建成区或者农业发展区,也是加强生态补偿与生态修复的重点关注区域;应严格控制此地带城乡建设用地规模,促进集约高效利用土地,实行城乡建设用地扩展边界控制,落实城乡建设用地空间管制制度。

基于土地利用的景观响应与生态服务价值构建的生态风险表征指数,能快速简便地建立起土地利用变化与区域生态风险之间的经验联系。同时,借助ESDA方法也能有效地映射出生态风险的空间分异特征和动态变化,可为海坛岛城市空间发展与生态保护决策提供数据支持和理论依据。以生态风险空间分布作为阻力面,基于累积耗费距离模型的“源地-廊道-节点”生态网络,是土地利用生态风险控制策略的一种优选空间化方案,可将城市建设、经济发展和生态环境保护协调起来,构建海坛岛土地利用生态风险防范的空间结构,这是有待进一步探讨的问题。

参考文献

- [1] He C-Y (何春阳), Shi P-J (史培军). Landscape Urbanization and Land System Modeling. Beijing: Science Press, 2009 (in Chinese)
- [2] Lu D-D (陆大道), Yao S-M (姚士谋), Li G-P (李国平), et al. Comprehensive analysis of the urbanization process based on China's conditions. *Economic Geography* (经济地理), 2007, **27**(6): 883 - 887 (in Chinese)
- [3] Turner BL, Lambin EF, Reenberg A. The emergence of land change science for global environmental change and sustainability. *Proceedings of the National Academy of Science of the United States of America*, 2007, **104**: 20666 - 20671
- [4] Ma Z-W (马宗文), Xu X-G (许学工). Summary of research methods on ecological effects of land change. *Geography and Geo-Information Science* (地理与地理信息科学), 2011, **27**(2): 80 - 86 (in Chinese)
- [5] Cai Y-L (蔡运龙), Lu D-D (陆大道), Zhou Y-X (周一星), et al. National demands for and development strategies of Chinese geography. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2004, **59**(6): 811 - 819 (in Chinese)
- [6] Liu SL, Cui BS, Dong SK, et al. Evaluating the influence of road networks on landscape and regional ecological risk: A case study in Lancang River Valley of Southwest China. *Ecological Engineering*, 2008, **34**: 91 - 99
- [7] Xia N-K (夏南凯), Qiao W (乔玮), Liu S (刘晟). A land-use based analysis of regional ecological risk index assessment method. *Urban Planning Forum* (城市规划学刊), 2011(1): 53 - 57 (in Chinese)
- [8] Shi T-M (石铁矛), Li S (李绥). Study on ecological risk warning of urbanization based on spatial information technology: A case study of Nanchong City. *City Planning Review* (城市规划), 2012, **36**(2): 51 - 57 (in Chinese)
- [9] Zhao Y-J (赵岩洁), Li Y-B (李阳兵), Shao J-A (邵景安). Ecological risk assessment of small watershed of the three gorges reservoir area based on land use change: A case study of Caotang River. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2013, **28**(6): 944 - 956 (in Chinese)
- [10] Chen SQ, Chen B, Brian DF. Ecological risk assessment on the system scale: A review of state-of-the-art models and future perspectives. *Ecological Modelling*, 2013, **250**: 25 - 33
- [11] Suter GW, Vermier T, Jr Munns WR, et al. Framework for the integration of health and ecological risk assessment. *Human and Ecological Risk Assessment*, 2003, **9**: 281 - 302
- [12] Shi P-J (史培军). Integrated Risk Governance Project: Science, Technology and Demonstration. Beijing: Science Press, 2011 (in Chinese)
- [13] Sun H-B (孙洪波), Yang G-S (杨桂山), Su W-Z (苏伟忠). Research progress on ecological risk assessment. *Chinese Journal of Ecology* (生态学报), 2009, **28**(2): 335 - 341 (in Chinese)
- [14] Shi H-P (石浩朋), Yu K-Q (于开芹), Feng Y-J (冯永军). Ecological risk assessment of rural-urban ecotone based on landscape pattern: A case study in Daiyue District of Tai'an City, Shandong Province of East China. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(3): 705 - 712 (in Chinese)
- [15] Wu J-S (吴健生), Qiao N (乔娜), Peng J (彭建). Spatial variation of landscape eco-risk in open mine area. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2013, **33**(12): 3816 - 3824 (in Chinese)
- [16] Xie H-L (谢花林). Regional eco-risk analysis of based on landscape structure and spatial statistics. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2008, **28**(10): 5020 - 5026 (in Chinese)
- [17] Anselin L, Getis A. Spatial statistical analysis and geographic information systems// Anselin L, Rey SJ, eds.

- Perspectives on Spatial Data Analysis (Advances in Spatial Science). Berlin: Springer, 2010: 35–47
- [18] Pingtan Statistical Bureau (平潭县统计局). Pingtan Statistic Yearbook in 2012. Beijing: China Statistics Press, 2012 (in Chinese)
- [19] Chen B-M (陈百明), Zhou X-P (周小萍). Explanation of current land use condition classification for national standard of the People's Republic of China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2007, **22** (6): 994–1003 (in Chinese)
- [20] Chen P (陈鹏), Wu J (吴剑), Fu S-F (傅世锋). Study on the dynamic change of landscape pattern and its landscape ecological effects in Haitan Island of Pingtan County. *Ecological Science* (生态科学), 2013, **32**(3): 265–270 (in Chinese)
- [21] Chen C-L (陈春丽), Lü Y-L (吕永龙), Wang T-Y (王铁宇). Emerging issues and prospects for regional ecological risk assessment. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(3): 808–816 (in Chinese)
- [22] Zeng Y (曾勇). The regional ecological risk assessment of Hohhot City. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(3): 668–673 (in Chinese)
- [23] Xu L-F (徐丽芬), Xu X-G (许学工), Lu Y-L (卢亚灵), et al. Integrated ecological risk assessment of J-50 based on natural disasters risk source. *Ecology and Environmental Sciences* (生态环境学报), 2010, **19** (11): 2607–2612 (in Chinese)
- [24] Xiao Y (肖杨), Mao X-Q (毛显强). Spatial analysis of regional landscape ecological risk. *China Environmental Science* (中国环境科学), 2006, **26**(5): 623–626 (in Chinese)
- [25] Xie G-D (谢高地), Zhen L (甄霖), Lu C-X (鲁春霞), et al. Expert knowledge based valuation method of ecosystem services in China. *Journal of Natural Resources* (自然资源学报), 2008, **23**(5): 911–919 (in Chinese)
- [26] Chen P (陈鹏). Evaluation on service value of wetland ecosystem in Xiamen City. *Wetland Science* (湿地科学), 2006, **4**(2): 101–107 (in Chinese)
- [27] Anselin L. Local indicators of spatial association. *Geographical Analysis*, 1995, **27**: 93–115
- [28] Chen Y-G (陈彦光). Reconstructing the mathematical process of spatial autocorrelation based on Moran's statistics. *Geographical Research* (地理研究), 2009, **28** (6): 1449–1463 (in Chinese)
- [29] Bone C, Wulder MA, White JC, et al. A GIS-based risk rating of forest insect outbreaks using aerial overview surveys and the local Moran's *I* statistic. *Applied Geography*, 2013, **40**: 161–170
- [30] Wang Z-Q (王政权). Geostatistics and Its Application in Ecology. Beijing: Science Press, 1999 (in Chinese)
- [31] Olivera MA, Webster R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and Kriging. *Catena*, 2014, **113**: 56–69

作者简介 吴剑男, 1982年生, 博士, 助理研究员. 主要从事海岛海岸带遥感监测与评价研究. E-mail: jianjian431@tom.com

责任编辑 杨弘
